

# 坑井内マイクロアレーによる指向性ポアホールレー ダ計測に関する研究

著者	海老原 聡
号	2027
発行年	1997
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/7300">http://hdl.handle.net/10097/7300</a>

氏 名	海老原 聡
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与 年 月 日	平成 9 年 9 月 1 0 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 資源工学専攻
学 位 論 文 題 目	坑井内マイクロアレーによる指向性ボアホールレーダ計測に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 新妻 弘明
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 新妻 弘明 東北大学教授 中塚 勝人 東北大学教授 澤谷 邦男 東北大学教授 佐藤 源之 東北大学助教授 浅沼 宏

## 論文内容要旨

### 第 1 章 序論

近年, 地下深部にある物体の計測法の 1 つとして直径 10cm ほどの坑井内にレーダを置くボアホールレーダの開発が進められている. 現在, ボアホールレーダ計測では, アンテナとしてダイポールアンテナを使用し, 物体の位置に関して坑井からの距離と深度の 2 次元計測を行っている. しかし, 地下に存在する物体の 3 次元的な位置・形状の計測は工学的な重要課題であり, 例えば, 水圧破碎法による地殻応力の定量的把握や核廃棄物の地下保管の際の調査などでは地下き裂の 3 次元的な計測が不可欠である. このような物体の 3 次元計測は波の伝搬時間だけでなく, 波の到来方向も推定可能な指向性ボアホールレーダによって可能になると考えられる.

一般に, 指向性レーダを実現するにはアレーの使用が考えられるが, ボアホールレーダでは坑井の直径が  $1/4$  波長以下となり, アレーが存在する空間に強い制限が加わる. この場合, 波の到来方向の推定に関して十分な分解能は期待できない. そこで, 本論文では, 高分解能スペクトル推定法を用いることにより分解能向上をねらい, 指向性ボアホールレーダ用アンテナとして「坑井内マイクロアレー」を以下のように定義し, 本論文で提案している.

坑井内マイクロアレーとは, 高分解能スペクトル推定法による信号処理を行うことを前提とし, 波長に対し小さな空間である坑井内 3 次元空間において高精度かつ多数点で界の測定が可能なアレーである.

本論文では, 上述した坑井内マイクロアレーを用いた指向性ボアホールレーダ計測の実現を目的としている. 主たる課題は坑井内マイクロアレーの試作, 坑井内マイクロアレー用位置推定法の導出, 実験によって坑井内マイクロアレーによる高分解能計測が可能であることを実証することである.

### 第 2 章 坑井内マイクロアレーの提案と試作

第 2 章では, 坑井内マイクロアレーを提案し, 坑井内マイクロアレーを用いた指向性ボアホールレーダシステムについて述べている. 本章における課題は坑井内の多数点で高精度に界のアレー計測が行えるボアホールレーダの設計と試作である.

まず, 坑井内マイクロアレーとして, 図 1 に示すような, 円筒上コンフォーマルアレーアンテナを採用した. 本アンテナは導体円筒上に微小ループを多数配列するアンテナアレーである. 本アンテナでは, 給電線が電磁界へ影響を与えずに 3 次元的にアンテナ素子が配列可能であり, アンテナ素子が広帯域な周波数特性

をもち、微小なため、高精度かつ多数点で界の測定が可能であると考えられる。レーダシステムには、高分解能かつ高精度な伝達特性の測定が期待できるネットワークアナライザを用いたレーダシステムを構築した。最後に、試作システムの性能を検証するため、東北大学構内の実験場で、坑井内マイクロアレーへ波を入射させる実験を行った。その結果、図2に示すように、坑井内の導体円筒上の多数点で波の到来方向を明確に示す時間遅延を測定できることを示した。また、その遅延時間は理論計算により求めた値にほぼ近いことが示された。

第2章で行ったフィールド実験の結果の意味は2つある。1つは坑井断面の多点で波の到来方向を示す遅延時間が得られたことである。これは測定システムが坑井内の界の測定に関して十分な分解能をもっていることを示している。さらに、もう1つの意味は、図2で、測定データが理論値と良く一致したことである。これは、坑井内マイクロアレーへの波の入射に対する各アンテナ素子の測定データを円筒状誘電体で覆われた導体円筒への平面波入射の理論モデルを用いて見積もることができることを示している。この理論モデルを用いることにより、高分解能スペクトル推定法を用いた到来波パラメータの高分解能推定が可能であると考えられる。

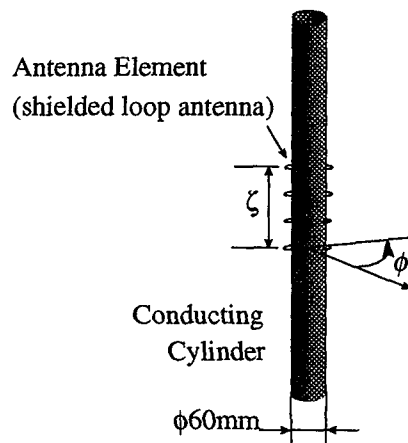


図1 導体円筒上コンフォーマルアレーアンテナ

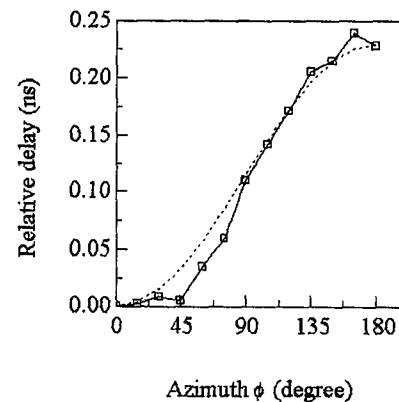


図2 坑井内に存在する導体円筒への波の入射の際、導体円筒上の円形アレー素子で測定された波の遅延時間の実験値(□)と理論値(破線),

### 第3章 坑井内マイクロアレーによる物体の3次元位置の推定

第3章では、坑井内マイクロアレーによる物体の3次元位置の高分解能推定法に関する検討を行っている。まず、高分解能スペクトル推定法として信号部分空間を利用する方法として注目されている MUSIC(Multiple Signal Classification)法をとりあげた。この MUSIC 法を坑井内マイクロアレー信号へ適用するには解決すべき2つの課題がある。1つは、アレーは坑井の中に存在するので多層円筒状誘電体中にアレーが存在すると考える必要があり、その影響を考慮に入れた推定法を開発することである。本章では、坑井の影響に関しては誘電体で覆われた導体円筒モデルを推定法の問題定式化の際に導入することにより解決した。第2の課題は、MUSIC法をレーダ計測に適用するには信号相関抑圧の前処理を行う必要があるが、通常の電磁波計測で用いられる空間スムージング法の適用が坑井内マイクロアレーでは困難であ

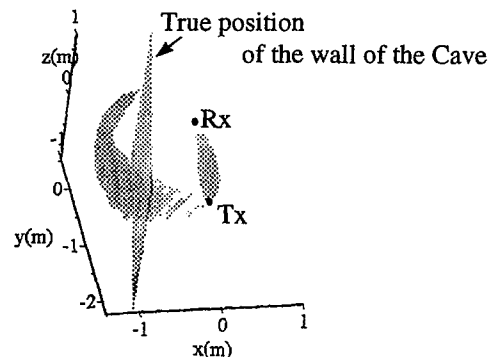


図3 反射物体位置の推定結果とその真の位置 (評価関数の極大位置を不透明にして表示)

り、検討を要することである。本章では、信号相関抑圧法として、ソナー計測で使用されており、波の広帯域性を利用する TCT(Two-sided Correlation Transformation) algorithm の適用を検討した。もともと、TCT algorithm は波の到来方向のみの推定で使用されていたが、波の遅延時間に対応した位相変化が波の振幅に生じるモデルを用いることにより波の遅延時間と到来方向推定へも適用可能とした。提案した推定法を検証するため、クロスホール計測の実験を東北大学構内で行い、測定データに提案した推定法を適用したところ、図3に示すように、坑井から1 m離れた所に存在する空洞の3次元位置の推定に成功した。

本章の意義は、坑井やアンテナ自体が存在することによるアレー信号への影響を考慮した物体位置推定法を導出し、実験的によりその妥当性を確かめたことによる。これまでのレーダ計測では、アレー周囲に層状構造の媒質が存在することを考慮した高分解能推定法の有効性を実験的に示した例は少ない。また、本章の推定法では小石や小さな空洞などによる不均質を考慮しなかったが、通常に存在する土を用いて行った実験では推定法が良好に動作した。このことは媒質自体がもつ不均質性に対しても提案した推定法が有効であることを示している。

#### 第4章 坑井内マイクロアレーによる到来波の偏波状態の推定

第4章では、坑井内マイクロアレーへの到来波の偏波状態推定を行うことを検討している。

任意の偏波状態の波が坑井内マイクロアレーに入射する場合、第3章で示した推定法のモデルを使用することが困難となる。これは、アレーへ入射すると仮定した波の偏波状態に直交する偏波状態をもつ波はアレー信号に出力をあたえないと仮定しているためである。本章では、アレー信号の定式化において、導体円筒上の  $H_z$  成分と  $H_\phi$  成分の両方のアレー信号を含む観測ベクトルを本章で新たに定義し、その観測ベクトルが直交する偏波状態の波の線形和で示されるモデルを導入した。これにより、任意の偏波状態の波の入射に対する問題の定式化を可能にした。推定法の妥当性を検討するために実験をおこなったところ、図4に示すように、到来する波の偏波状態の推定が波源の位置とともに推定可能であることを確認した。

本章の成果は、坑井内マイクロアレーによる計測で偏波情報を活用することができる可能性を示したことにある。偏波情報を用いることにより、例えば、物体からの反射波の偏波状態が物体形状により異なることを利用し、位置推定に関する分解能向上が期待できる。また、反射波の偏波状態によって物体の幾何学的な形状を推定するポラリメトリックレーダ計測ができる可能性がある。

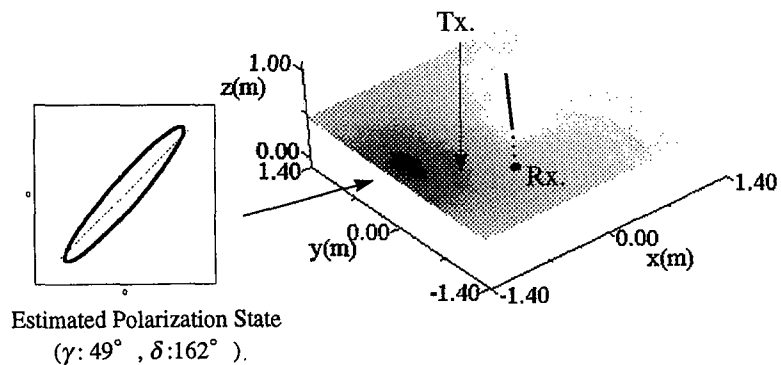


図4 波源の位置と放射される波の偏波状態推定結果

#### 第5章 坑井内マイクロアレーに含まれる坑井に沿う伝搬モード成分の抑圧

第5章では、シングルホール計測で問題となる送信アンテナからの直接波の抑圧法を検討している。

第3章と第4章では、坑井内マイクロアレーへ平面波が入射すると仮定していた。しかし、シングルホール計測における送信アンテナからの直接波は坑井に沿う伝搬モードとなっており、このモードを平面波入射でモデル化することは困難である。さらに、坑井に沿う伝搬モードは各アンテナ素子間で生じる遅延時間、振幅分布を一意に予測することは難しく、単純なモデルを構築することは困難であった。本章では、坑井内マイクロアレーの導体円筒上の  $z$  軸方向に配列した直線アレーにより、坑井に沿う伝搬モードの  $z$  軸方向の波数は坑井の外に存在する媒質の中の平面波の波数に等しいことを実験的に明らかにした。これを坑井に沿う伝搬モードのモデルとして、3次元物体位置推定法に導入し、坑井に伝搬モードを信号処理により抑圧する方法を提案した。この方法の妥当性を検討するため、東北大学構内の実験場でシングルホール計測を行い、

波の到来方向の2次元推定を行った。その結果、図5に示すように、坑井に沿う伝搬モードモデルを導入した推定法を用いた場合では、導入しない場合に比べ、推定方向を示すピークが鋭くなることを確認した。これは伝搬モードモデルの導入が坑井に沿う伝搬モードの抑圧に効果を示したと考えられる。

シングルホール計測において、送信アンテナからの直接波の抑圧はボアホールレーダ計測一般における課題であった。これまで、直接波と反射波の間で波の伝搬方向が異なることや波の到達時刻が異なるという情報を別々に用いることにより、直接波と反射波を分離していた。本章で提案した方法は、坑井内マイクロアレーが坑井内の3次元空間でアレー計測していることを利用し、直接波と反射波の伝搬方向と到達時刻が異なることの両方を利用したパラメトリックな手法で、高分解能に分離する手法を提案したといえる。

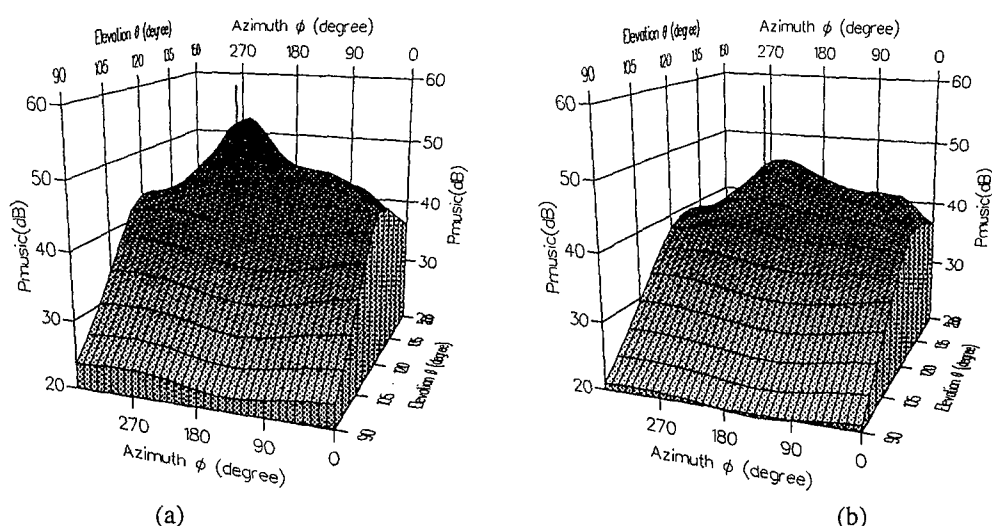


図5 波の到来方向推定結果 (a) 伝搬モードモデルの導入した場合, (b) 伝搬モードモデルの導入しない場合

## 第6章 結論

本研究は、坑井内マイクロアレーを用いた指向性ボアホールレーダ計測の実現を目的とした。これまでの指向性ボアホールレーダにない高分解能スペクトル推定法によるアレー信号処理を最大の特徴とする坑井内マイクロアレーをボアホールレーダ計測へ導入するための課題、問題点の提示とその具体的な解決方法を提案した。さらに、それらの提案した方法の妥当性を実験によって確認した。本研究の成果は単一の坑井を用いて坑井から数m離れた地下深部に存在する物体を3次元的にレーダ計測できる可能性を示唆しており、地下開発の際に不可欠な情報となる地下埋設物や地下き裂などの3次元位置・形状推定の実現に貢献したといえる。

## 審査結果の要旨

地下深部の詳細な情報取得は、資源工学、地殻工学、岩盤工学、等の分野において特に重要な技術である。本論文は、坑井を利用した地下電磁計測法であるボアホールレーダ計測に関して、坑井周辺物体の3次元位置とその性状を明らかにできる、マイクロアレーと超解像信号処理を組み合わせた新たな指向性ボアホールレーダを提案するとともに、その実現のための問題点の提示と具体的な解決方法を示し、さらに実験によりそれらの有効性を確認したもので、全文6章からなる。

第1章は序論である。第2章では、反射波の伝搬時間だけでなくその到来方向も推定可能な指向性ボアホールレーダとして、坑井内マイクロアレーアンテナによる新しい形態のボアホールレーダを提案するとともに、実験によりその特性を明らかにしている。その結果、検出される信号が、円筒状多層誘電体で囲まれた導体円筒への平面波入射モデルによって説明できるとともに、超解像信号処理を可能にする感度と広帯域特性を有していることを明らかにしている。

第3章では、マイクロアレーによる物体位置の3次元高分解能推定法としてMUSIC (Multiple Signal Classification) アルゴリズムをとりあげ、問題点の提示と具体的な解決法を論じている。まず、多層誘電体で囲まれた導体円筒への平面波入射モデルにより、坑井の影響を考慮した波動場の定式化を行い、次にTCT (Two-sided Correlation Transformation) アルゴリズムによる新しい信号相関抑圧法により、反射波の遅延時間と到来方向の高分解能同時推定を可能とする新たな手法を提示している。さらに、フィールド実験を行い、空洞の3次元位置の推定に成功するとともに、不均質媒質中でも本手法が良好に動作することを確認している。これは画期的な成果である。

第4章では、到来する反射波の偏波状態推定法について論じている。まず、導体円筒上の磁界の軸方向成分と周方向成分からなる観測ベクトルにより、任意の偏波状態の入射波を定式化する方法を提案し、それを第3章で提示したアルゴリズムに適用することにより到来波の偏波状態が推定できることを明らかにしている。さらに、フィールドにおいてモデル実験を行い、本方法の有効性を実証している。これは、ボアホールレーダ計測において物体位置推定の分解能向上と物体の幾何学的性状推定を可能にする重要な成果である。

第5章では、坑井に沿って伝搬する送信アンテナからの直達波の抑圧法について論じている。ここでは、坑井に沿う伝搬モードの坑井軸方向の波数が坑井の外に存在する媒質中の波数に等しいことを実験的に見だし、それに基づき、直達波を信号処理により抑圧する新たな方法を導出している。これは、ボアホールレーダを実用する際の重要な手法を与えるものである。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、ボアホールレーダによる地下電磁計測に関し、新しい計測概念と具体的な手法を提案し、さらにフィールド実験によってその有効性を実証したもので、資源工学ならびに地殻工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。